

УДК 533.6.011.6:614.628

А.Г. Виноградов, канд.фіз.-мат.наук

Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля, м. Черкаси, Україна

АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ КОНЦЕНТРАЦІЇ КРАПЕЛЬ У ДРЕНЧЕРНИХ СИСТЕМАХ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ

Представлен метод теоретического расчета пространственного распределения концентрации капель дренчерной водяной завесы. В основу метода положены полученные ранее уравнения траекторий сферических капель.

The method of theoretical calculation of the spatial distributing of concentration of drops of drencher aquatic curtain is presented. The equations of trajectories of spherical drops got before are fixed in basis of the method.

1. Вступ Останнім часом при проектуванні систем протипожежного захисту різноманітних будівель і споруд набуло значного поширення таке технічне рішення, як дренчерна водяна завіса [1, 2]. Водяні завіси виконують функції охолодження й запобігання розповсюдження пожежі та її небезпечних чинників через віконні, дверні й технологічні прорізи за межі зони або приміщення, що захищається, а також для забезпечення безпечних умов для евакуації людей із приміщень під час пожежі.

Найбільш типовим є використання дренчерних завіс у гіпермаркетах, театрах, вокзалах, тобто у великих за площею приміщеннях із масовим перебуванням людей. Крім того, вони використовуються для захисту постійно відкритих технологічних прорізів у виробничих будівлях. Головною перевагою дренчерних завіс є те, що вони дають можливість не виділяти протипожежними стінами пожежні відсіки і зберегти необхідну торгову, виробничу або іншу площу. Довжина реально проєктованих сьогодні дренчерних завіс, що використовуються як компенсуючий захід замість протипожежних стін, досягає 250 м.

Значною проблемою є те, що відсутній достатній досвід експлуатації таких завіс, відсутня інформація про виконання ними своїх функцій при реальних пожежах. В нормативних документах питання необхідності використання дренчерних завіс, особливості їх проєктування відображені недостатньо [1].

У зв'язку з цим актуальними є виконані в останні роки теоретичні дослідження водяних завіс, які певною мірою можуть відповісти на окремі питання стосовно їх властивостей, оптимізації методів їх застосування й доцільності їх використання в тих чи інших умовах. Зокрема, в роботах [3-5] розглянуті деякі аспекти процесів теплового екранування водяними завісами та отримані відповідні математичні рівняння. В роботах [6, 7] розглянуті процеси формування водяної завіси, визначені співвідношення для розрахунку поточних координат, швидкостей та інших параметрів траєкторій крапель водяної завіси. Одержані формули використані для комп'ютерної побудови траєкторій за різних початкових умов. В роботі [8] запропонована методика розрахунку просторового розподілу концентрації крапель в межах водяної завіси і виконані відповідні комп'ютерні розрахунки та побудова графіків. Але всі згадані роботи присвячені дослідженню водяних завіс, сформованих щільним насадком на пожежний ствол. Дренчерні ж водяні завіси на даний час залишаються поза увагою теоретичних досліджень.

Одним із найбільш важливих параметрів водяної завіси, який суттєво впливає на її екрануючу здатність, є концентрація крапель. В статті поставлена задача розв'язати проблеми, не вирішені в попередніх публікаціях: 1) розробка методики теоретичного розрахунку розподілу концентрації крапель в межах дренчерної водяної завіси; 2) застосування даної методики для розрахунків за допомогою комп'ютерних програм.

2. Теоретичні розрахунки Розглянемо водяну завісу, створену дренчерним зрошувачем лопаткового типу (рис. 1.). Такий зрошувач розташовується горизонтально й призначений для створення водяної завіси у вертикальній площині. Віялоподібний потік водяних крапель формується відбиваючою площиною й розташовується перпендикулярно до осі зрошувача.

Для аналізу траєкторій крапель введемо наступні позначення величин: \vec{v} – поточний вектор швидкості краплі, α – поточний кут нахилу вектора швидкості краплі до горизонтальної площини, α_0 – його початкове значення (рис. 2.). Для спрощення будемо вважати, що зрошувач створює рівномірний потік однакових сферичних крапель діаметром d з початковою швидкістю \vec{v}_0 в межах сектора шириною $\Delta\alpha_0$ (кут розкриття потоку). Кут $\Delta\alpha_0$ визначається через мінімальне значення кута α_0 :

$$\Delta\alpha_0 = \pi - 2 \cdot \alpha_{0\min},$$



Рис. 1. Дренчерний зрошувач

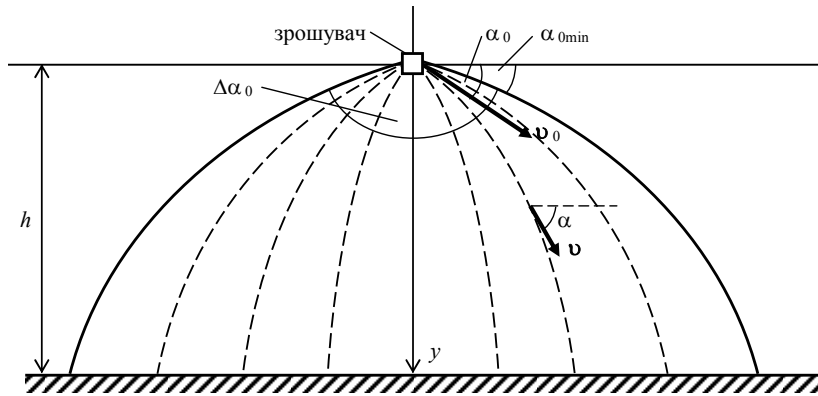


Рис. 2. Схема водяної завіси

де куту α_{0min} відповідає траєкторія, найбільш віддалена від осі водяної завіси.

Для розрахунку розподілу концентрацій крапель використаємо комп'ютерний розрахунок їх траєкторій, методика якого представлена в роботі [6]. В даній роботі були отримані рівняння для поточних координат краплі в залежності від кута α , які для випадку завіси, схема якої представлена на рис. 2, мають такий вигляд:

$$x = \frac{1}{g} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha \cdot \{A + B \cdot [\tan \alpha \cdot \sec \alpha + \ln(\tan \alpha + \sec \alpha)]\}}, \quad (1)$$

$$y = \frac{1}{g} \int_{\alpha_0}^{\alpha} \frac{\tan \alpha \cdot d\alpha}{\cos^2 \alpha \cdot \{A + B \cdot [\tan \alpha \cdot \sec \alpha + \ln(\tan \alpha + \sec \alpha)]\}}, \quad (2)$$

де використані позначення:

$$A = \frac{1}{v_0^2 \cdot \cos^2 \alpha_0} - B \cdot [\tan \alpha_0 \cdot \sec \alpha_0 + \ln(\tan \alpha_0 + \sec \alpha_0)],$$

$$B = \frac{C \cdot \rho_1 \cdot S}{2 \cdot m \cdot g} = \frac{3 \cdot \rho_1}{8 \cdot \rho_2 \cdot d \cdot g},$$

де C – аеродинамічний коефіцієнт (для краплі у формі кулі $C = 0,5$); ρ_1 – густина повітря; ρ_2 – густина води; $S = \pi \cdot d^2/4$ – площа міделевого перерізу краплі; α_0 – початкове значення кута α ; g – прискорення вільного падіння; m – маса краплі; v_0 – її початкова швидкість.

В роботі [7] одержана розрахункова формула для модуля поточної швидкості краплі також залежно від кута α :

$$v = \frac{1}{\cos \alpha \cdot \sqrt{A + B \cdot [\tan \alpha \cdot \sec \alpha + \ln(\tan \alpha + \sec \alpha)]}}. \quad (3)$$

Формули (1) і (2) представляють траєкторію краплі в параметричній формі, де як параметр виступає кут α . Вони не дають можливості знайти аналітичне рішення в явному вигляді, але дозволяють побудувати траєкторії за допомогою комп'ютерного пакету прикладних програм MathCAD. На рис. 3 представлені побудовані в MathCAD траєкторії крапель для різних значень кута α_0 та для наступних умов: $h = 3$ м, $v_0 = 15$ м/с, $d = 0,5$ мм.

Будемо вважати, що краплі в межах завіси не змінюються за розміром, не відбувається їх розпад, коагуляція або будь-яка взаємодія. В цьому випадку кількість крапель, що перетинають будь-який переріз водяної завіси за одиницю часу, є однаковою і дорівнює початковій кількості крапель N , яка генерується зрошувачем за одиницю часу.

Для довільної ділянки горизонтального перерізу водяної завіси довжиною b (товщина завіси) і шириною dx кількість крапель, що перетинають її за одиницю часу:

$$dN = n \cdot v \cdot \sin \alpha \cdot b \cdot dx, \quad (4)$$

де n – концентрація крапель у даній точці простору. Звідси:

$$n = \frac{1}{v \cdot \sin \alpha \cdot b} \cdot \frac{dN}{dx}. \quad (5)$$

Отже, концентрація крапель у кожній точці водяної завіси залежить від густини траєкторій крапель dN/dx у даній ділянці простору, від вертикальної складової швидкості крапель $v \cdot \sin \alpha$, а також від товщини завіси b . На рис. 3 можна побачити, що густина траєкторій суттєво змінюється вздовж водяної завіси. Велика на початку водяної завіси (поряд зі зрошувачем), вона монотонно зменшується донизу.

Для визначення впливу вертикальної складової швидкості крапель на їх концентрацію в MathCAD була виконана побудова графічних залежностей її оберненої величини (у відповідності до (5)) від вертикальної координати (рис. 4.). Для цих залежностей характерною є значна динаміка на початковій ділянці траєкторій, після чого вони змінюються слабо.

Товщина завіси b (поперечний розмір) для плоскої водяної завіси є значно меншою порівняно з її шириною (розміром уздовж осі x). Вона обмежена траєкторіями крапель, близьких до вертикальної площини. Залежність товщини від вертикальної координати y можна вважати приблизно лінійною, що добре погоджується з поведінкою розрахованих вище траєкторій, найбільш близьких до вертикальної осі (рис. 3.). Цю залежність можна наближено представити у вигляді:

$$b = \frac{b_m}{h} \cdot y = \tan \beta \cdot y, \quad (6)$$

де b_m – максимальна товщина завіси (при $y = h$), h – висота завіси, β – кут розкриття потоку крапель у площині $y-z$.

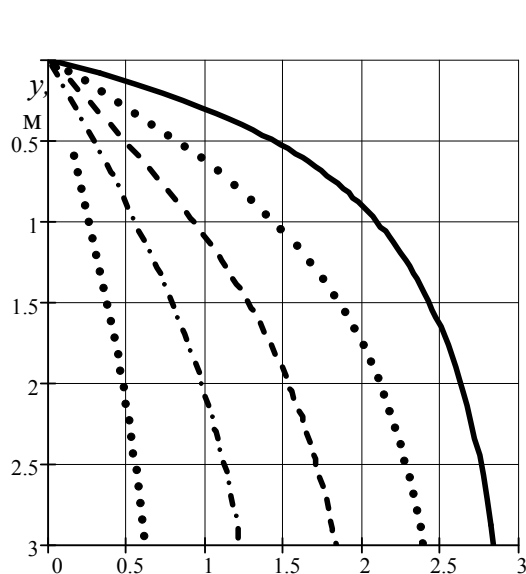


Рис. 3. Траєкторії крапель для різних значень кута α_0 : 15° – суцільна лінія, 30° – крапки, 45° – пунктир, 60° – штрих-пунктир, 75° – крапки

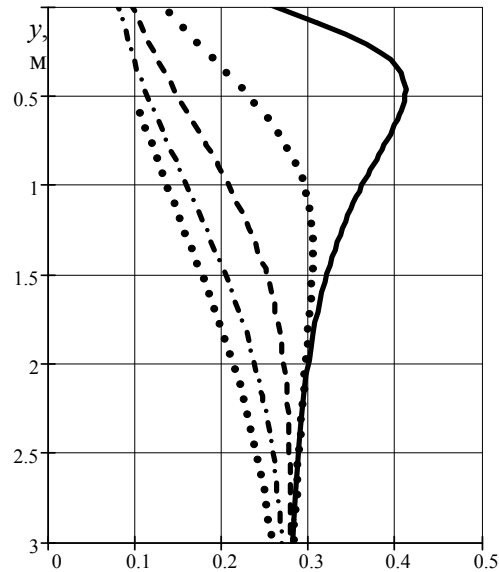


Рис. 4. Залежності оберненої величини вертикальної складової швидкості крапель від вертикальної координати (для умов рис. 3.)

В даній роботі поставлена задача виконати розрахунок розподілу концентрацій крапель для завіси, створеної зрошувачем, який створює рівномірний початковий потік крапель у деякому тілесному куті шириною $\Delta\alpha_0$ і товщиною β .

Виконаємо перетворення формули (5) з урахуванням співвідношень (1)-(3) з метою їх використання для комп'ютерного розрахунку.

Представимо похідну в формулі (5) через початковий кут α_0 :

$$\frac{dN}{dx} = \frac{dN}{d\alpha_0} \cdot \left(\frac{dx}{d\alpha_0} \right)^{-1}. \quad (7)$$

У разі ізотропного розподілу густини потоку крапель в межах сектора $\Delta\alpha_0$ перший множник можна замінити середнім значенням похідної:

$$\frac{dN}{d\alpha_0} = \frac{N}{\Delta\alpha_0}. \quad (8)$$

Другий множник у (7) визначається аналітично за допомогою співвідношення (1):

$$\frac{dx}{d\alpha_0} = - \frac{1}{g \cdot \cos^2 \alpha_0 \cdot \{A + B \cdot [\tan \alpha_0 \cdot \sec \alpha_0 + \ln(\tan \alpha_0 + \sec \alpha_0)]\}} = - \frac{v_0^2}{g}. \quad (9)$$

Ще один множник у (5) (швидкість крапель v) визначається зі співвідношення (3).

Підставляючи в (5) вирази (3), (8) і (9), отримаємо розрахункову формулу для концентрації крапель залежно від параметрів α_0 і α :

$$n(\alpha_0, \alpha) = \frac{N \cdot g \cdot \sqrt{A + B \cdot [\tan \alpha \cdot \sec \alpha + \ln(\tan \alpha + \sec \alpha)]}}{b \cdot \Delta\alpha_0 \cdot v_0^2 \cdot \tan \alpha}. \quad (10)$$

Величина N у межах даного наближення (всі краплі мають однаковий діаметр d) може бути приблизно розрахована, виходячи зі збереження об'ємів води, що проходить через перерізи завіси і зрошувача:

$$N \cdot \frac{\pi \cdot d^3}{6} = Q,$$

Витрата води Q – це параметр зрошувача, який визначається за формулою:

$$Q = K \cdot \sqrt{p}, \quad (11)$$

де p – тиск перед зрошувачем, K – паспортний параметр зрошувача. Наприклад, для зрошувача типу «Завіса-48» російського виробництва $K = 48$ (p визначається в атм., Q – в л/хв.). Якщо перейти до одиниць СІ (відповідно Па і м³/с), отримаємо коефіцієнт $K = 2,53 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Па}^{1/2} \cdot \text{с}$. Звідси знайдемо:

$$N = \frac{6 \cdot K \cdot \sqrt{p}}{\pi \cdot d^3}. \quad (12)$$

Початкову швидкість крапель можна оцінити, вважаючи її рівною швидкості потоку води у вихідному отворі зрошувача діаметром d_0 (для зрошувача типу «Завіса-48» $d_0 = 10$ мм). Прирівнюючи витрати води, отримаємо:

$$v_0 \cdot \frac{\pi \cdot d_0^2}{4} = K \cdot \sqrt{p}.$$

Звідси:

$$v_0 = \frac{4 \cdot K \cdot \sqrt{p}}{\pi \cdot d_0^2}. \quad (13)$$

З урахуванням (6), (12) і (13) співвідношення (10) перетвориться до вигляду:

$$n(\alpha_0, \alpha) = \frac{3 \cdot \pi \cdot g \cdot d_0^4 \cdot \sqrt{A + B \cdot [\tan \alpha \cdot \sec \alpha + \ln(\tan \alpha + \sec \alpha)]}}{8 \cdot K \cdot d^3 \cdot \sqrt{p} \cdot y \cdot \Delta \alpha_0 \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta}, \quad (14)$$

або, після підстановки виразів для A і B :

$$n(\alpha_0, \alpha) = \frac{3 \cdot \pi \cdot g \cdot d_0^4}{8 \cdot K \cdot d^3 \cdot \sqrt{p} \cdot y \cdot \Delta \alpha_0 \cdot \tan \alpha \cdot \tan \beta} \times \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot d_0^4}{16 \cdot K^2 \cdot p \cdot \cos^2 \alpha_0} - \frac{3 \cdot \rho_1}{8 \cdot \rho_2 \cdot d \cdot g} \cdot \left[\frac{\tan \alpha_0}{\cos \alpha_0} - \frac{\tan \alpha}{\cos \alpha} + \ln \frac{\cos \alpha \cdot (1 + \sin \alpha_0)}{\cos \alpha_0 \cdot (1 + \sin \alpha)} \right]}, \quad (15)$$

Дане співвідношення дозволяє виконати розрахунок локальної концентрації крапель в деякій точці вертикальної площини, що відповідає заданим параметрам α_0 і α . Координати даної точки визначаються співвідношеннями (1) і (2). Таким чином, співвідношення (1), (2) і (15) в параметричному вигляді задають розподіл концентрацій крапель у вертикальній площині.

Необхідно врахувати, що для процесів теплового екранування важливим параметром є не власне концентрація крапель, а добуток концентрації на товщину завіси – площинна концентрація крапель (кількість крапель на одиницю площі):

$$n_s = n \cdot b = n \cdot \tan \beta \cdot y. \quad (16)$$

Нижче наведений розрахунок саме цієї величини.

3. Чисельні розрахунки Як приклад, виконаємо розрахунок розподілу площинної концентрації крапель n_s для типових параметрів: $h = 3$ м, $d = 0,5$ мм, $p = 3 \cdot 10^5$ па, $\kappa = 2,53 \cdot 10^{-6}$ м³/па^{1/2}·с, $\Delta \alpha_0 = 150^\circ$, $d_0 = 10$ мм.

Для розрахунку в MathCAD параметри α_0 і α були представлені у вигляді матриць:

$$\alpha_{0i} = \frac{\pi}{12} + i \cdot \frac{\pi}{36}, \quad \alpha_{i,j} = \alpha_{0i} + \frac{j}{15} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{0i} \right),$$

де індекси i і j приймають цілочисельні значення $i = 0 \dots 14$, $j = 0 \dots 14$. Для цих значень параметрів в MathCAD одержані відповідні матриці значень величин x , y і n_s .

Графік, побудований в MathCAD за цими даними, представлений на рис. 5. На рисунку показані два різних ракурси графіка для більш повного уявлення про одержану залежність.

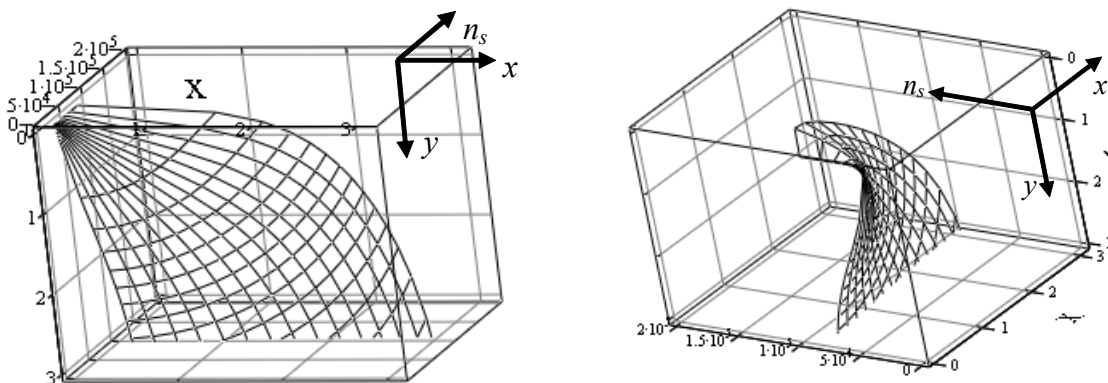


Рис. 5. Графік розподілу площинної концентрації крапель водяної завіси (розрахунок в MathCAD) у двох ракурсах

Згідно з отриманими результатами, площинна концентрація крапель має доволі складний просторовий розподіл. Це пов'язано з дією множників, що входять до складу співвідношення (5): вертикальної складової швидкості крапель (див. Рис. 4.) і густини їх траєкторій dN/dx . Загалом, на середнє значення концентрації крапель водяної завіси, сформованої дренажною системою протипожежного захисту, впливає велика кількість параметрів, що входять до складу формули (15). За допомогою цієї формули можна досліджувати їх вплив на властивості водяної завіси та визначати оптимальні режими її функціонування.

4. Висновки Отримані математичні співвідношення для просторового розподілу концентрації крапель водяної завіси дозволяють виконувати чисельні розрахунки і будувати графічні залежності для різних умов формування завіси. Очевидно, такі ж розрахунки можуть бути виконані на комп'ютері чисельним методом. Проте перевагою одержаного вище

результату є те, що знайдені аналітичні співвідношення дозволяють, окрім виконання чисельних розрахунків, за формою математичних виразів аналізувати вплив на властивості водяної завіси великої кількості різноманітних параметрів.

Співвідношення (1) і (2) для координат сумісно зі співвідношенням (15) для локальної концентрації крапель в параметричному вигляді (параметрами є величини α_0 і α) представляють розподіл концентрацій крапель водяної завіси у вертикальній площині. Істотним обмеженням при виконанні розрахунків є припущення про однакові величини початкової швидкості і діаметра всіх крапель. Для виконання розрахунків, близьких до реальної картини, необхідно ввести відповідні розподіли даних параметрів у початкові умови.

Наступним етапом дослідження повинно бути вдосконалення методики розрахунку з урахуванням залежності середнього діаметру крапель від тиску перед зрошувачем. Крім того, для більш адекватного розрахунку геометричних характеристик водяної завіси необхідно враховувати явище руху повітряних мас під дією розпиленіх водяних струменів. Корисним було б також порівняння теоретичних розрахунків з результатами відповідних експериментальних досліджень.

Список літератури

1. Жаров А., Зархин А., Митрофанова М. Дренчерные завесы: теория и практика // БДИ. – 2006. – № 5 (68). – с. 24-28.
2. Оросители водяных и пенных автоматических установок пожаротушения / Л.М. Мешман, С.Г. Цариченко, В.А. Былинкин, В.В. Алешин, Р.Ю. Губин; Под общ. ред. Н.П. Копылова. – М.:ВНИИПО, 2002. – 315с.
3. Виноградов А.Г. Экранирование конвективных тепловых потоков водяными завесами // Вісник Сумського державного університету, серія „Технічні науки (машинобудування)”. – 2003. – №12(58). – с. 19-23.
4. Виноградов А.Г. Экранирование теплового излучения водяными завесами // Промислова гідроліка і пневматика. – 2005. – № 3(9). – с. 52-54.
5. Виноградов А.Г. Розсіяння теплового випромінювання сферичними краплями води // Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», сер. Машиностроение. – 2005. – №47. – с. 51-54.
6. Виноградов А.Г. Розрахунки траєкторних параметрів крапель водяної завіси у вертикальній площині // Вестник НТУУ «Киевский политехнический институт», сер. Машиностроение. – 2008. – №53 –с84-88
7. Виноградов А.Г. Розрахунок векторного поля швидкостей крапель водяної завіси // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2008. – №2 (49). Частина 2 – с. 42-44.
8. Виноградов А.Г. Теоретический анализ пространственного распределения концентрации капель водяной завесы // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – т. 19. – №1 – с. 45-49.

УДК 533.9

В.М. Пашенко канд.техн.наук, доц., О.С. Василенко асп.
НТУ України «Київський політехнічний інститут» м.Київ, Україна

ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЮВАЧА ІЗ КРИВОЛІНІЙНИМ ДУГОВИМ КАНАЛОМ

В статье представлено результаты исследования энергетических характеристик нового класса плазменных распылителей – плазмотронов с криволинейным дуговым каналом, которые позволяют организовать ввод обрабатываемого дисперсного материала еще на стадии формирования плазменного потока, что повышает эффективность использования энергии электрической дуги и приводит к существенному повышению производительности напыления тугоплавких материалов.

The results of research of power descriptions of new class of plasma nebulizers are presented in the article - plasma nebulizers with a curvilinear arc channel, which allow to organize the input of the processed dispersible material yet on the stage of forming of plasma stream, that promotes efficiency of the use of energy of voltaic arc and results in the substantial increase of the productivity of nanospray of refractory materials.

Вступ та актуальність роботи. Висока твердість, жаро- та зносостійкість, низькі значення електро- та теплопровідності обумовлюють сферу практичного використання покриттів на основі керамічних оксидів (оксидів кремнію, алюмінію, титану, цирконію, тощо). Разом з тим, керамічним оксидам притаманні властивості і характеристики, які значно відрізняються від матеріалів, що традиційно використовуються у процесах газотермічного нанесення покриттів (головним чином металів та композицій на їх основі). Зокрема, це висока температура плавлення; відносно мала густина матеріалу; значна величина теплоти плавлення, малі коефіцієнти